

поскольку, как показано выше, они не отражают существа процессов, приводящих к инициированию взрыва. Построение кривых частот взрывов (см. рис. 6) — промежуточный этап исследования, необходимый для определения скорости w_0 , соответствующей H_{50} . Для последующего определения энергии удара, вызывающего взрыв ЖВВ с вероятностью 50%, использовались данные рис. 3.

Результаты настоящих экспериментов не позволяют сделать всесторонний вывод о чувствительности ЖВВ к механическим воздействиям, так как дают ограниченную информацию о стадии развития взрыва в неоднородной жидкости. В частности, возможно, что относительно большой величиной критического диаметра детонации объясняется отсутствие взрывных явлений при испытании бутилнитрата и бутилендинитрата.

Институт химической
физики АН СССР,
Москва

Поступила в редакцию
11/XII 1975

ЛИТЕРАТУРА

1. Ф. П. Боуден, А. Д. Иоффе. Возбуждение и развитие взрыва в твердых и жидких веществах. М., ИЛ, 1955.
2. В. Е. Гордеев, А. И. Сербинов, Я. К. Трошин. Докл. АН СССР, 1967, 172, 2, 383.
3. Э. И. Андрианкин, В. К. Боболев, А. В. Дубовик. ФГВ, 1972, 8, 3.
4. К. К. Андреев, Ю. А. Терехина. — В кн.: Теория взрывчатых веществ. М., Оборонгиз, 1963.
5. Г. Т. Афанасьев, В. К. Боболев и др. — В сб.: Взрывное дело, № 63/20. М., «Недра», 1967.
6. А. В. Дубовик, В. К. Боболев. ФГВ, 1970, 6, 2.
7. Г. Эберт. Краткий справочник по физике. М., Физматгиз, 1963.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБЖАТИЯ ОБЛИЦОВКИ УДЛИНЕННОГО КУМУЛЯТИВНОГО ЗАРЯДА И ФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КУМУЛЯТИВНОГО НОЖА

Б. И. Шехтер, Л. А. Шушко, С. Л. Крыськов

Кумулятивный эффект [1—6] широко используется в мирной и военной технике. Одновременно ведутся многочисленные исследования с целью расширения области применения и повышения эффективности изделий на его основе, разрабатываются новые кумулятивные заряды.

В последнее время стали применять так называемые удлиненные кумулятивные заряды (УКЗ) [6—8]. Они отличаются от обычных, осесимметричных тем, что при взрыве создают кумулятивный нож.

Наиболее подробно изучено струеобразование осесимметричных кумулятивных зарядов. Явления, связанные с формированием кумулятивного ножа, рассматривались либо применительно к сварке взрывом [9—11], либо в очень специфических условиях [12, 13]. Процесс обжатия облицовки УКЗ и формирования кумулятивного ножа имеет существенные особенности и еще слабо изучен. Его понимание необходимо для технически грамотного конструирования и применения удлиненных кумулятивных зарядов. Некоторым из этих вопросов посвящена настоящая статья.

Модель

Рассмотрим наиболее простой вариант удлиненного кумулятивного заряда с клиновидной (в виде изогнутого уголка) металлической облицовкой плотностью ρ_0 , толщиной δ_0 , шириной l_0 и углом полураствора α_0 . Заряд взрывчатого вещества плотностью ρ_v имеет постоянную толщину δ_v , а ширина его и угол полураствора выемки соответствуют аналогичным параметрам облицовки. УКЗ такой формы принято называть клиновидным (рис. 1).

Для простоты будем полагать, что боковая волна разгрузки отсутствует, а фронт детонационной волны (ДВ) плоский. Такой фронт можно сформировать, используя различные методы инициирования [5, 9, 14]. Плоский фронт может быть прямым и косым. В том и другом случае угол его наклона ψ к поверхности нормального сечения УКЗ (см. рис. 1) меняется от 0 до $\pi/2$.

Обозначим скорость фронта ДВ вдоль оси Ox через D_x , а ее проекцию на нормаль к фронту через D' . Тогда для прямой детонационной волны $D' = D$ и

$$D_x = D / \cos \psi, \quad (1)$$

а для косой ДВ при $D_x = D$

$$D' = D \cos \psi. \quad (2)$$

Предположим, что металлическая облицовка — идеальная несжимаемая жидкость. Вектор скорости метания ее элементов при обжатии лежит в плоскости, перпендикулярной начальному положению облицовки и проходящей через вектор скорости D' . Если в косой ДВ выполняется условие Чепмена—Жуге, зависимость для давления в косой ДВ имеет вид

$$p' = \rho_v D'^2 / (k+1) \cdot \cos^2 \psi, \quad (3)$$

где k — показатель адиабаты продуктов взрыва. Следовательно, для косого фронта

$$v' / D' = v / D = F(\eta), \quad v' = v \cos \psi, \quad (4)$$

где v' и v — конечные скорости метания элементов пластины косой и прямой ДВ без учета действия боковой волны разгрузки, $F(\eta)$ — некоторая функция параметра η , определяемая одним из методов решения задачи метания взрывом [5, 9].

Равенства (2) — (4) формально справедливы в диапазоне $0 \leq \psi \leq \pi/2$. Однако в действительности угол ψ должен быть значительно меньше $\pi/2$. Это объясняется тем, что давление в химическом пике ДВ конденсированных ВВ примерно в 1,5 раза превосходит давление в плоскости Чепмена — Жуге и не может быть меньше необходимого для возбуждения интенсивной химической реакции. Тогда в результате оценочного расчета

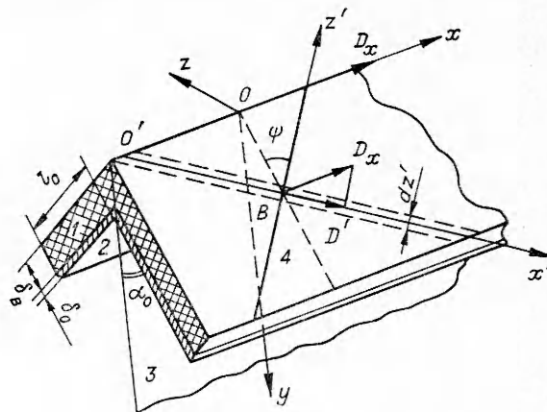


Рис. 1. Общий вид клиновидного УКЗ.

1 — заряд ВВ; 2 — металлическая облицовка; 3 — плоскость симметрии, в которой формируется кумулятивный нож; 4 — фронт детонации заряда (одно из возможных положений).

получим $0 \leq \psi \leq \pi/4$. Зависимости для случая прямого фронта детонации широко известны, и приводить их нет необходимости. В дальнейших рассуждениях будем полагать, что элементы облицовки приобретают конечную скорость мгновенно.

Исследование обжатия облицовки УКЗ плоской ДВ

Для анализа выберем две правые системы координат (см. рис. 1). Система $Oxyz$ имеет ось Ox , проходящую вдоль ребра облицовки, и плоскость xOy , совпадающую с плоскостью симметрии УКЗ; система $Bx'y'z'$ имеет ось Bx' , перпендикулярную фронту, и Bz' , проходящую

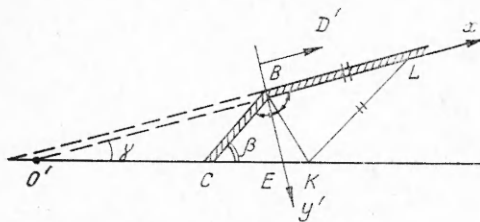


Рис. 2. Схема метания элементов облицовки в плоскости H .

вдоль фронта ДВ. Векторы скоростей v' и D' лежат в плоскости $x'By'$, которую обозначим через H . Она перпендикулярна плоскости $x'Bz'$ начального положения облицовки, которую обозначим через O_0 .

Рассмотрим метание элементов облицовки, расположенных вдоль $O'x'$. Для этого выделим элементарную полоску шириной dz' , как показано на рис. 1. Кар-

тина схлопывания выделенных элементов в плоскости H имеет вид, изображенный на рис. 2. Так как клиновидная облицовка симметрична, достаточно рассмотреть из всей картины обжатия только ее половину, лежащую по одну сторону от плоскости симметрии xOy . Элементы облицовки разгоняются скользящей ДВ, поэтому вектор скорости метания направлен по линии BK — биссектрисе угла LBC [4, 9]. Если принять $BL=D'$ и $BK=v'$, на основании [4, 9] и равенств (3) и (4) получим

$$v'/D' = v/D = 2 \sin[(\beta - \gamma)/2]. \quad (5)$$

В результате движения элементов правой и левой части облицовки происходит ее схлопывание. При этом она приобретает крышеобразную конфигурацию, которая видна на рентгенограмме взрыва УКЗ (рис. 3, а) и схематически показана на рис. 4. Обозначим плоскость одной из половин этой конфигурации через P . На рис. 4 наряду с ней изображены плоскости O_0 , H и Q . Последняя параллельна оси Ox и проходит через вектор скорости v' элемента облицовки, лежащего в окрестности точки B .

Можно показать, что точка E пересечения оси Oy' с плоскостью симметрии УКЗ (см. рис. 2 и 4) всегда лежит на плоскости yOz . Тогда $\tan \gamma = BE/O'B$. Поскольку $BE/l_0 = \tan \alpha_0$ и $O'B/l_0 = \cos \psi$, получим

$$\tan \gamma = \tan \alpha_0 \cdot \sin \psi. \quad (6)$$

По известным координатам точек O , B , A , O' и взаимному расположению плоскостей и линий ($O'K$ — линия пересечения H и xOy , $O_0 \perp \vec{v}'$) находим последовательно уравнения плоскостей O_0

$$y \tan \alpha_0 + z = 0$$

и H

$$x \tan \psi - y \cos \alpha_0 + z \sin \alpha_0 = 0,$$

а также прямой $O'K$

$$(x + \operatorname{ctg} \psi) / \operatorname{ctg} \psi = y / \sec \alpha_0 = z / O.$$

Здесь и в дальнейшем x , y и z означают соответствующие координаты, отнесенные к l_0 .

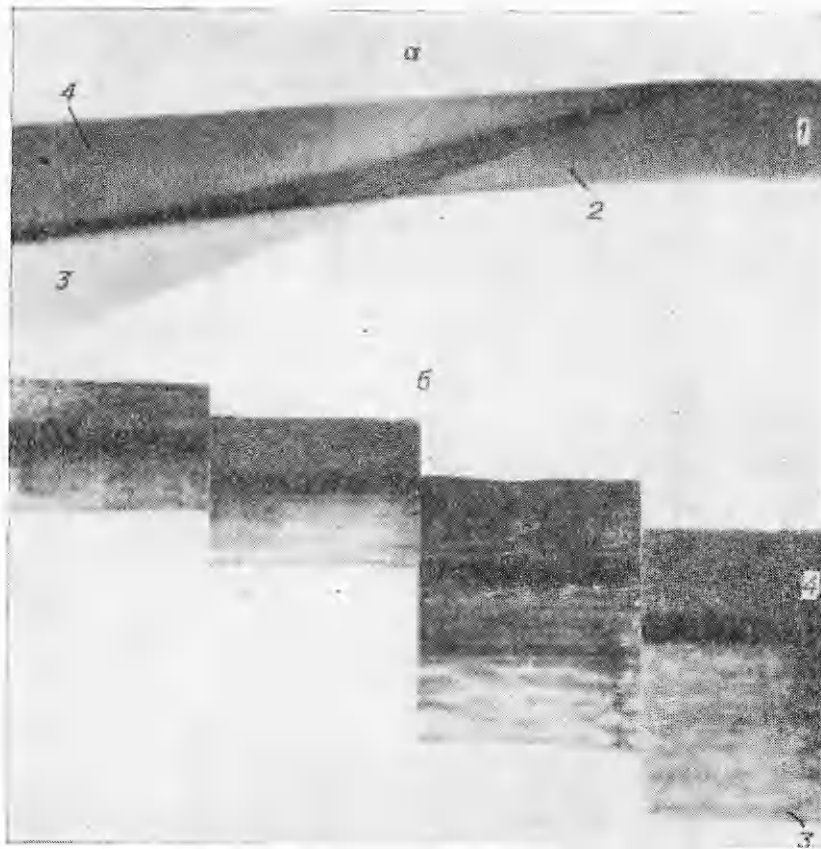


Рис. 3. Типичные рентгенограммы, полученные при исследовании клиновидных УКЗ на импульсной рентгеновской установке.

а) кадр в момент взрыва УКЗ при $\psi < \pi/2$; б) кадры движения головной части кумулятивного ножа при $\psi = \pi/2$. 1 — начальное положение облицовки; 2 — крышеобразная конфигурация, образованная облицовкой; 3 — кумулятивный нож; 4 — пест.

Координаты точек C и K , необходимые для дальнейшего анализа, непосредственно в системе $Oxyz$ определить не представляется возможным. Поэтому сначала следует найти их координаты в системе $Bx'y'z'$, сделав перенос начала из O в B и соответствующий поворот осей. Установив уравнения $O'K$, BC и BK в новой системе координат, находим точку C , как пересечение линий $O'K$ и BC , а K — как пересечение $O'K$ и BK . Затем делаем обратный поворот осей и перенос начала координат в точку O . Тогда получим координаты искомых точек:

точки C

$$x_c = -\cos \psi (\operatorname{tg}^2 \alpha_0 - \xi^3) [\xi (2 - \xi \sin \psi) + \operatorname{tg}^2 \alpha_0 \sin \psi]^{-1},$$

$$y_c = 2\xi \sec \alpha_0 [\xi (2 - \xi \sin \psi) + \operatorname{tg}^2 \alpha_0 \sin \psi]^{-1}, \quad z_c = 0;$$

точки K

$$x_k = \xi \cos \psi / (1 - \xi \sin \psi), \quad y_k = \sec \alpha_0 / (1 - \xi \sin \psi), \quad z_k = 0;$$

$$\xi = \operatorname{tg} \alpha_0 \operatorname{tg}[(\beta - \gamma)/2] = \operatorname{tg} \alpha_0 [(2D/v)^2 - 1]^{-1/2}. \quad (7)$$

Из полученных зависимостей следует, что координаты точек C и K для прямой и косой ДВ при равных значениях η , α_0 и ψ одинаковы, т. е. не зависят от характера плоского фронта. При $\psi \rightarrow 0$, согласно (6), $\gamma \rightarrow 0$, а $\xi \rightarrow \operatorname{tg} \alpha_0 \operatorname{tg} \beta/2$, $x_c \rightarrow -\operatorname{tg} \alpha_0 / \operatorname{tg} \beta$, $y_c \rightarrow \sec \alpha_0$ и $x_k \rightarrow \xi$, $y_k \rightarrow y_c$; на основании (5) $\beta \rightarrow 2 \arcsin (v/2D)$. При $\psi \rightarrow \pi/2$ $\gamma \rightarrow \alpha_0$, $\xi \rightarrow \operatorname{tg} \alpha_0 \operatorname{tg}[(\beta -$

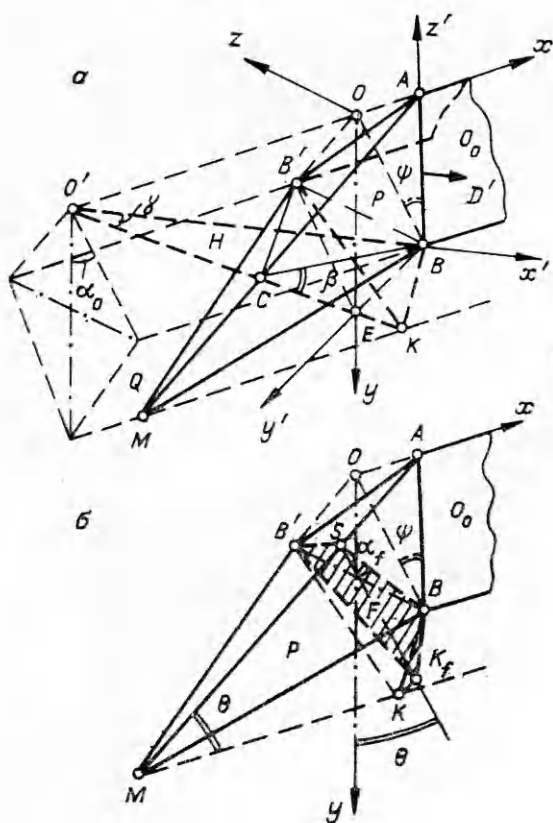


Рис. 4. Схема схлопывания облицовки клиновидного УКЗ (обозначения точек соответствуют рис. 1 и 2).

Таким образом, определено положение и геометрия облицовки во время ее обжатия и можно перейти к рассмотрению процесса формирования элементов кумулятивного ножа.

Исследование процесса формирования элементов кумулятивного ножа

Элементы кумулятивного ножа образуются при соударении соответствующих элементов облицовки. Векторы скорости их метания $\vec{v}'$ в неподвижной системе координат равнонаправлены векторам $\vec{BK}$ и $\vec{B'K'}$ (см. рис. 4) и лежат в плоскостях, параллельных плоскости BKB' и наклонных к линии схлопывания AM . Поэтому задача определения вектора скорости $\vec{w}$ элемента кумулятивного ножа и песта трехмерна и представляет значительные трудности. Решать ее целесообразно, опираясь на экспериментальные данные.

Опыты были проведены по схеме, показанной на рис. 5. Часть элементов ножа перехватывалась заведомо непробиваемым отсекателем. Неотсеченная часть ножа оставляла на массивной стальной плите-свидетеле кратер. Зная расстояние от поверхностей отсекателя до свидетеля h и расстояние от отметок проекции отсекателя на свидетель до начала или конца кратера s , по очевидной зависимости

$$\operatorname{tg} \varepsilon = s/h$$

$\alpha)/2]$, $x_c \rightarrow 0$, $y_c \rightarrow \sec \alpha_0 \times [1 + \operatorname{tg} \alpha_0 \operatorname{ctg} (\beta - \alpha_0)]^{-1}$ и $x_K \rightarrow 0$, $y_K \rightarrow \sec \alpha_0 \{ [1 - \operatorname{tg} \alpha_0 \operatorname{tg} [(\beta - \alpha_0)/2]]^{-1}$, $\beta \rightarrow \alpha_0 + 2 \arcsin (v/2D)$.

Если обозначить время схлопывания элементов облицовки шириной l_0 для прямой ДВ через t и для косой — через t' , то безразмерное время получается из равенств

$$\tau = vt/l_0 = v't'/l_0 = BK/l_0.$$

Относительную величину BK/l_0 определим по координатам точек B и K (7). Тогда

$$\tau = 2D/v \cdot \operatorname{tg} \alpha_0 / [\sqrt{(2D/v)^2 - 1} - \operatorname{tg} \alpha_0 \sin \psi],$$

Теперь можно найти уравнение плоскости P , проходящей через точки A , B и C координаты которых известны:

$$x \cos \psi + y A \cos \alpha_0 + z B \sin \alpha_0 - \sin \psi = 0; \quad (8)$$

$$A = 1/2 (\operatorname{tg}^2 \alpha_0 / \xi - \xi) + \sin \psi;$$

$$B = 1/2 (\xi - \xi / \operatorname{tg}^2 \alpha_0) - \sin \psi.$$

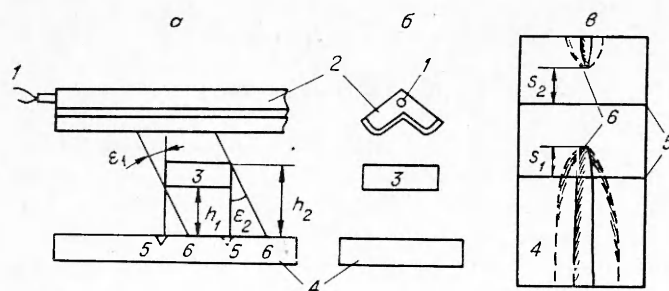


Рис. 5. Схема опыта (а, б) по определению направления движения элементов ножа и вид сверху (в) плиты-свидетеля после испытаний.

1 — капсоль-детонатор; 2 — УЗ3; 3 — стальная плита-отсекатель; 4 — стальная плита-свидетель; 5 — отметки проекции отсекающей на свидетель; 6 — кратер, образованный неотсеченными элементами кумулятивного ножа.

находим угол между вектором скорости элементов кумулятивного ножа и плоскостью нормального сечения УЗ3. При образовании глубокого кратера на отсекателе вводилась соответствующая поправка в значении h . Взаимодействие ножа с отсекателем и свидетелем рентгенографировалось.

Условия и результаты опытов приведены в таблице. Там же помещены опытные значения углов θ между линией схлопывания AM и ребром необжатой облицовки (см. рис. 4), определенные по рентгенограммам. Разброс результатов измерений от опыта к опыту не превышал $\pm 2^\circ$. Из таблицы следует, что с ошибкой не более 10% опытные значения углов θ и ε равны, т. е. можно принять $\vec{\omega} \perp AM$.

Условия опытов*				Количество опытов	Результаты опытов			Результаты расчетов	
материал об- лицовки	l_0 , мм	α_0 , град	η		средние значе- ния		$\frac{\theta-\varepsilon}{\theta}$, %	по равенству (9) θ^{**}	$\frac{\theta-\varepsilon}{\theta}$, %
					θ	ε			
Ст. 3	20	40	1,245	3	15°30'	16°30'	-6,5	17°10'	+3,0
	20	45	1,245	3	14°30'	15°	-3,5	16°30'	+9,5
Медь отожжен- ная	26	55	0,727	5	13°	12°	+7,7	11°	-9,0
	30	55	1,09	5	14°30'	13°	+10,0	13°	0
	30	55	1,12	5	14°	13°30'	+3,6	14°	+3,6

Найдем плоскость F , проходящую через точку B и нормальную к линии схлопывания AM , а следовательно, к плоскостям P и xOy (см. рис. 4). Тогда уравнение плоскости F имеет вид

$$xA \cos \alpha_0 - y \cos \psi + C = 0;$$

$$C = y_k \cos \psi - x_k A \cos \alpha_0 = \cos \psi / \cos \alpha_0 \cdot (1 - A \xi \cos^2 \alpha_0) / (1 - \xi \sin \psi).$$

Угол θ между плоскостями F и yOz равен углу наклона прямой AM к оси Ox . Поэтому угловой коэффициент прямой AM в плоскости xOy

* Заряд ВВ из пластифицированного гексогена ($\rho_B = 1,62$ г/см³; $D = 7600$ м/с).

** При расчете углов θ учтено влияние боковых волн разгрузки на скорость метания элементов облицовки по методике [7]; $\psi = 0$.

$dy/dx = -\operatorname{tg}\theta$. Установив уравнение AM по координатам точек A и C , вычислим производную

$$\operatorname{ctg}\theta = A \cos \alpha_0 / \cos \psi. \quad (9)$$

В таблице представлены рассчитанные по этой зависимости значения углов θ , которые имеют максимальное отклонение от средних опытных значений углов ε и θ соответственно 10 и 15%. Эти данные говорят об удовлетворительном соответствии результатов расчета и опыта, а также справедливости допущений.

Поскольку принято, что вектор скорости элемента кумулятивного ножа лежит в плоскости F , значение ω определяется проекцией скорости обжатия на эту плоскость, т. е. величинами v_f — для прямой и v'_f — для косой ДВ. Полагая для прямого фронта $O'B = D$ и $BK = v$ (см. рис. 4), придем к равенству

$$v_f = BK_f / l_0 \cdot v / \tau,$$

где BK_f — проекция BK на плоскость F . Для косого фронта $O'A = D$, $O'B = D'$ и $BK = v'$, следовательно,

$$v'_f = BK_f / l_0 \cdot v' / \tau.$$

Определим BK_f . Для этого необходимо спроектировать точку K на плоскость F . Проекция K_f имеет координаты

$$\begin{aligned} x_{Kf} &= [x_K + \operatorname{ctg}\theta (y_K - \cos \alpha_0)] / (1 + \operatorname{ctg}^2 \theta), \\ y_{Kf} &= [(x_K + y_K \operatorname{ctg}\theta) \operatorname{ctg}\theta + \cos \alpha_0] / (1 + \operatorname{ctg}^2 \theta), \quad z_{Kf} = 0. \end{aligned}$$

По координатам точек B и K_f найдем уравнение BK_f :

$$x/x_{Kf} = (y - \cos \alpha_0) / (y_{Kf} - \cos \alpha_0) = (z + \sin \alpha_0) / (\sin \alpha_0),$$

а также

$$\begin{aligned} BK_f / l_0 &= a \sin \alpha_0, \\ a &= \sqrt{\frac{x_{Kf}^2 + (y_{Kf} - \cos \alpha_0)^2}{\sin^2 \alpha_0}} + 1. \end{aligned} \quad (10)$$

Следовательно,

$$v_f = v / \tau \cdot a \sin \alpha_0; \quad v'_f = v' / \tau \cdot a \sin \alpha_0. \quad (11)$$

Угол схлопывания между облицовками в плоскости F равен $2\alpha_f$, удвоенному двугранному углу между плоскостями P и xOy . Тогда

$$\cos \alpha_f = \cos \alpha_0 \cos (\beta - \gamma) - \sin \alpha_0 \sin (\beta - \gamma) \sin \psi. \quad (12)$$

По уравнениям прямой BK_f и плоскости xOy найдем угол ω_f между ними по равенству

$$\sin \omega_f = 1/a. \quad (13)$$

Используя теорию сходящихся струй [1, 3—5], получим для косой ДВ скорость элемента ножа в плоскости F

$$\omega_{1f} = v'_f \frac{\sin [\omega_f + (\alpha_f/2)]}{\sin (\alpha_f/2)} \quad (14)$$

и скорость элемента песта

$$\omega_{2f} = v_f \frac{\cos [\omega_f + (\alpha_f/2)]}{\cos (\alpha_f/2)}. \quad (15)$$

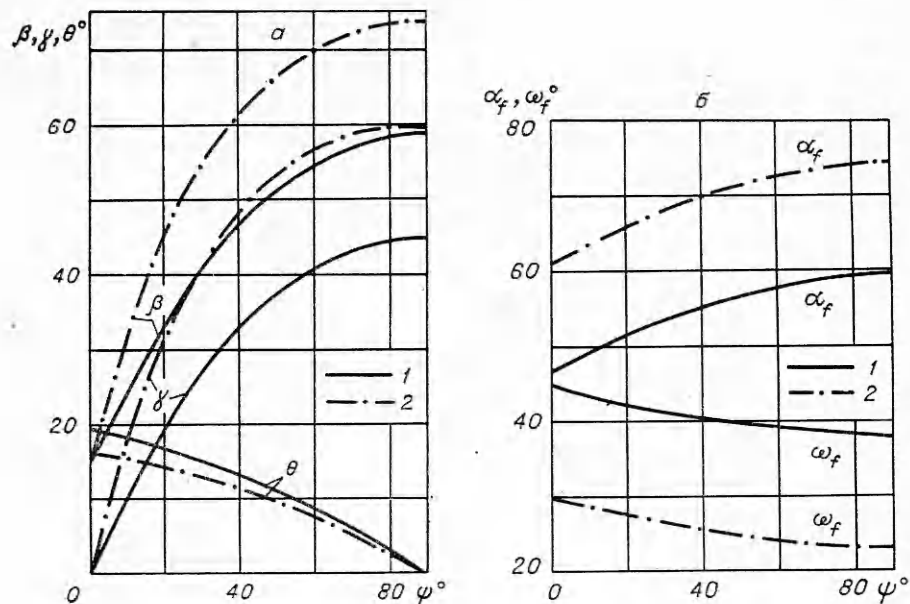


Рис. 7. Зависимости углов β , γ , θ (а) и α_f , ω_f , (б) от ψ , рассчитанные для клиновидных УКЗ при $\alpha_0 = 45^\circ$ (1) и $\alpha_0 = 60^\circ$ (2).

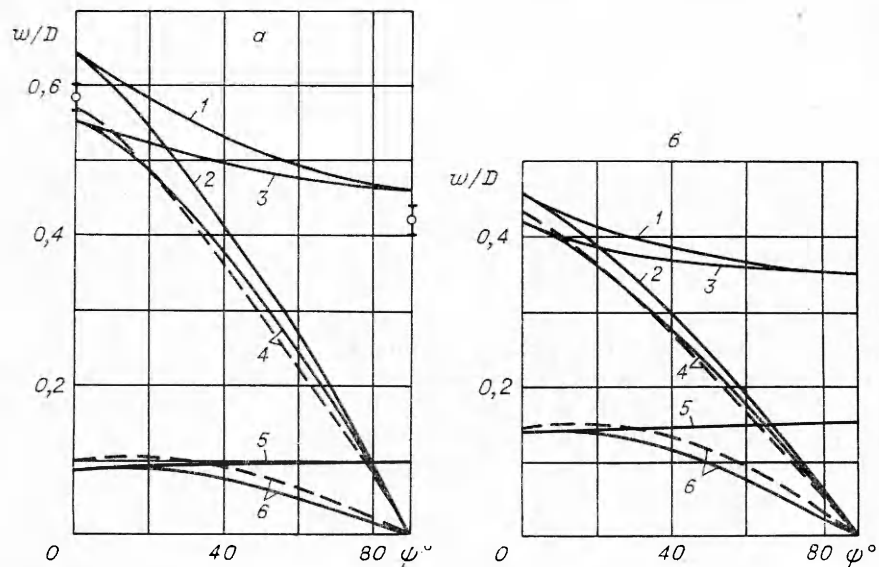


Рис. 8. Зависимости относительных скоростей кумулятивного ножа и песта от ψ , рассчитанные для клиновидных УКЗ при $\alpha_0 = 45^\circ$ (а) и $\alpha_0 = 60^\circ$ (б).

1 — w_1/D ; 2 — w'_1/D ; 3 — w_{1f}/D ; 4 — w'_{1f}/D ; 5 — w_{2f}/D ; 6 — w'_{2f}/D .

$\approx 1,46$. Результаты вычислений показаны на рис. 7, 8, из которых следует, что с увеличением угла ψ скорость ножа уменьшается и особенно сильно в случае косой ДВ ($\psi \rightarrow \frac{\pi}{2}$; $w'_1 \rightarrow 0$).

Для реальных конструкций УКЗ одной из причин, определяющих эффективность изделий, является скорость элементов кумулятивного ножа. Как было показано, максимума она достигает при $\psi = 0$. Для анализа действия УКЗ необходимо также рассмотреть влияние других параметров, как отдельных элементов (толщину, плотность, вязкость,

сжимаемость, угол встречи с преградой и пр.), так и всего ножа в целом (растяжимость, монолитность и т. д.). Учесть же все эти факторы сложно, особенно в вершине трехгранного угла A (см. рис. 4), где формируется головной элемент кумулятивного ножа. Комплексный учет всех причин, влияющих на эффективность УКЗ,—самостоятельная задача, которая должна быть предметом особых исследований.

Такой параметр элемента ножа, как толщина, может быть определен в пределах сформулированной модели. Используя зависимости теории соударяющихся струй [1, 3, 5], получим

$$\delta_1/\delta_0 = \sin^2(\alpha_f/2); \quad \delta_2/\delta_0 = \cos^2(\alpha_f/2),$$

где δ_1 и δ_2 — толщины ножа и песта соответственно.

Для оптимизации конструкции УКЗ необходимо рассчитывать большое количество вариантов. Поэтому целесообразно упростить метод расчета параметров элементов кумулятивного ножа и песта, приняв $v_f = v$, $v'_f = v'$ и $\alpha_f + \omega_f = 90^\circ$. Тогда для косой ДВ

$$w'_{1f} = v' \operatorname{ctg}(\alpha_f/2); \quad w'_{2f} = v' \operatorname{tg}(\alpha_f/2).$$

В случае прямой ДВ в этих равенствах следует использовать соответствующие значения скоростей. Остальные величины находятся по ранее выведенным зависимостям (7)—(9), (12), (17)—(19). Такое упрощение справедливо в условиях $0 \leq \psi \leq 30^\circ$, которые обычно реализуются при работе УКЗ. На рис. 8 штриховой линией показаны результаты приближенного расчета, которые с ошибкой до 5% согласуются с результатами точного метода (сплошные линии — точный расчет, точки — среднее опытное значение w_1/D , указаны пределы разброса).

Принятая в работе модель и разработанные на ее основе методики расчета проверены экспериментально при крайних значениях угла $\psi = 0$ и $\pi/2$; $\alpha_0 = 45^\circ$. Для снижения действия боковой волны разгрузки применялся массивный металлический борт. Иницирование заряда обеспечивало плоскую прямую ДВ [9]. Часть облицовки в вершине угла была срезана. Этим исключалось влияние разгона облицовки на скорость головной части кумулятивного ножа, которую определяли по рентгенограммам, аналогичным помещенным на рис. 3, а ($\psi = 0$) и 3, б ($\psi = \pi/2$). Разброс и средние значения скоростей, найденные по трем опытам, показаны на рис. 8. Из полученных данных следует, что средние скорости ножа ниже рассчитанных на 8—10%. Очевидно, необходимо учитывать вязкость металла облицовки.

Предположим, что материал облицовки — вязкая несжимаемая жидкость, а условия течения соответствуют плоской задаче. Тогда по данным работы [10]

$$u_1 = u_0 \sqrt{1 - 2v(1 - \sin \alpha_f)/\delta_0 u_0 \sin^2 \alpha_f}, \quad (20)$$

где u_0 и u_1 — проекции скоростей струй (сходящихся и кумулятивной) на плоскость F в системе координат, связанной с точкой на линии AM (см. рис. 4); v — кинематическая вязкость металла облицовки.

Решим задачу соударения струй [1, 3—5] в лабораторной системе координат, используя равенства (20) и соотношения $w_f = u_1 + u$; $u_0 = v \cdot \sin \omega_f / \sin \alpha_f$; $u = v \cdot \sin(\alpha_f + \omega_f) / \sin \alpha_f$.

В результате найдем

$$w_f = v_f \frac{\sin \omega_f}{\sin \alpha_f} \left[\sqrt{1 - \frac{2v(1 - \sin \alpha_f)}{\delta_0 v_f \sin \alpha_f \sin \omega_f}} + \frac{\sin(\alpha_f + \omega_f)}{\sin \omega_f} \right]. \quad (21)$$

В рамках принятой модели формула (21) справедлива во всем диапазоне значений угла ψ и при $\psi = \pi/2$ ($\gamma = \alpha_0$; $\alpha_f = \beta$; $\omega_f = \pi/2 - (\alpha_0 + \beta)/2$, $v_f = v$) переходит в выражение, найденное применительно к сварке взрывом [10]

$$w_1 = v \frac{\cos \frac{\beta - \alpha_0}{2}}{\sin \beta} \left[1 + \frac{\cos \frac{\alpha_0 + \beta}{2}}{\cos \frac{\beta - \alpha_0}{2}} \sqrt{1 - \frac{2v(1 - \sin \beta)}{\delta_0 v \sin \beta \cdot \cos \frac{\alpha_0 + \beta}{2}}} \right]. \quad (22)$$

В работе [15] приведены экспериментальные значения динамической вязкости меди, по которым $v = (2,2 \div 3)$ м²/с. Однако при таких v скорость элементов кумулятивного ножа, рассчитанная по зависимости (21) при $\psi = 0$ и (22) $\psi = \pi/2$, значительно меньше, чем опытная. Очевидно, вязкость меди, определенная в работе [15], выше, чем в условиях УКЗ, так как скорость деформирования в первом случае меньше. Расчетные и опытные данные для УКЗ удовлетворительно согласуются при $v = 1$ м²/с (см. рис. 8). Учет вязкости, использующий решение плоской задачи для УКЗ, не является корректным. Более точное решение пока невозможно, поэтому в первом приближении следует остановиться на предложенном [10] методе.

Таким образом, в результате анализа процессов обжатия облицовки удлиненного кумулятивного заряда плоской скользящей детонационной волной (косой и прямой при $0 \leq \psi \leq \pi/2$) и формирования элементов кумулятивного ножа и песта предложена модель и методы расчета их параметров (точный и приближенный). Эти данные необходимы для определения эффективности УКЗ.

Раменское отделение ВНИИГеофизики,
г. Раменское Московской области

Поступила в редакцию
8/XII 1975

ЛИТЕРАТУРА

1. М. А. Лаврентьев. Усп. мат. наук, 1957, 12, 4.
2. Г. И. Покровский. Боевое применение направленного взрыва. М., Воениздат, 1944.
3. М. А. Лаврентьев, Б. В. Шабат. Проблемы гидродинамики и их математические модели. М., «Наука», 1973.
4. G. Birkhoff, D. McDougall a. o. J. Appl. Phys., 1948, 19, 6.
5. Физика взрыва. Под ред. К. П. Станюковича. Изд. 2. М., «Наука», 1975.
6. Вспомогательные системы ракетно-космической техники. Сб. переводов. Под ред. И. В. Тишунина. М., «Мир», 1970.
7. Л. А. Шушко, Б. И. Шехтер, С. Л. Крыськов. ФГВ, 1975, 11, 2, 264.
8. В. Оплат. Зарубежное военное обозрение, 1974, 9, 29.
9. А. А. Дерибас. Физика упрочнения и сварки взрывом. Новосибирск, «Наука», 1972.
10. С. К. Годунов, А. А. Дерибас, В. И. Мали. ФГВ, 1975, 11, 1, 3.
11. А. А. Дерибас, И. Д. Захаренко. ФГВ, 1975, 11, 1 151.
12. В. И. Мали. ФГВ, 1973, 9, 2, 282.
13. В. И. Мали, В. В. Пай, А. И. Сковпин. ФГВ. 1974, 10, 5, 755.
14. Г. А. Авакян, Л. А. Шушко. Взрывчатые вещества и средства инициирования. Ч. I. М., 1966.
15. С. К. Годунов, А. А. Дерибас и др. ФГВ, 1971, 7, 1, 135.